

工事条件と労働災害の関連の分析

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN CONSTRUCTION CONDITIONS AND OCCUPATIONAL ACCIDENTS OCCURRENCE

花 安 繁 郎*
By Shigeo HANAYASU

Various multivariate analysis methods were applied to the analysis of occupational accidents in tunnelling work in order to investigate the basic relationship between construction characteristics in sites and accidents occurrence. 69 tunnel construction sites were selected out for the analysis after checking the homogeneity of the data structure. From the correlation and PCA analysis, one of the major factors in tunnel construction is the overall accident frequency rate, which has no positive relation between many construction variables concerned. While, the fatal accident frequency rate tends to be smaller in workplaces where the geological condition of strata was worse. A multiple regression function and a discriminant function were proposed to predict the number of accidents and to distinguish whether or not a workplace may have fatal accidents during the construction period.

Keywords : occupational accidents, tunnel construction, multivariate analysis

1. ま え が き

わが国では毎年の労働災害のほぼ 3 割、特に死亡災害での 4 割以上もの多くが建設工事で発生している。このうち、土木工事における災害は、昭和 58 年の統計によれば、発生数では全建設工事災害の約 1/3 の 29.9%、死亡災害では半数もの 52.2% を占めており、建築工事に比べて発生数は少ないが、死亡数が多い特徴がある。また、災害発生の頻度率を示す災害度数率や、発生した災害の傷病程度を示す災害強度率などの災害指標も、他の屋外型産業と同様に、建設業は高い値を示している¹⁾。

工事中に発生するこれらの労働災害は、作業対象、作業環境・条件、施工法などの差により、その発生特性も異なると思われるが、そのことを明らかにする災害分析法には、災害を 1 件ずつ丹念に原因や背景を系統的に調べあげて災害の発生過程を解き明かし、その結果を災害防止対策に結びつけてゆこうとする FTA や CTA などのミクロ的な分析法と²⁾、同一の工種や作業内容によって発生した災害をとりまとめ、そこでの共通的な災害特性を解明しようとするマクロ的な分析法とに分けられる。

本報告は、工事条件と労働災害との関連を明らかにする目的で、山陽新幹線広島・山口県内で建設されたトンネル工事 (86 本、総延長 158.8 km) を事例としてとりあげ、多変量解析法によりマクロな分析を行った結果をとりまとめたものである。

分析では、工事記録や災害資料から分析可能な項目を抽出し、これらのデータの均質性の検討を加えたのち、まず、抽出された多数のデータ項目の相互関係と全体構造を知るために、相関分析および主成分分析を行った。その結果、全体の災害率が多くの項目と無相関であるのに対して、死亡災害率は地質条件と関係していることがわかった。そこで、判別分析によって死亡災害発生有無の条件をより明確にすることを試み、最後に、重回帰分析によって災害発生数の予測を行い、工事変量と発生した災害数との関連について検討を加えた。

2. 基本データの作成と吟味

調査の対象としたトンネル数は全部で 86 あったが、長大トンネルでは複数の工区に分割して施工されたり、あるいは、短小トンネルではひとつの事業所がいくつかのトンネルをまとめて施工した場合があったので、分析対象の個体には、事業者がひとつの事業所を形成した、いわゆる工区と呼称されるものを単位とし、全部の工区

* 正会員 労働省産業安全研究所
(〒108/港区芝 5-35-1)

数は 75 であった。

各工区の施工条件に関連した資料には国鉄がとりまとめた工事記録³⁾を利用し、労働災害の資料には事業所より所轄労働基準監督署へ報告された労働者死傷病報告⁴⁾による。工事記録より分析可能なデータとして、施工長(延長)、施工月数、総掘進時間、平均岩種など 11 種の連続変数を変数としてとりあげることができ、これらの変数の一覧を表-1 に示した。ここでの平均岩種とは、国鉄制定の岩分類の分類コード*の数値と岩種ごとの施工距離との積和を延長で除して平均化した値で、工区の平均的岩特性を示す数値である。また総掘進時間数は、上記の岩分類においてそれぞれの岩種に対する 1m 当たりの所要掘進時間数が与えられているので⁵⁾、各岩種の施工距離と所要時間数との積和として求めた。支保工建込数は、上半での建込数とし、ロックボルトは 10 本を

表-1 データ項目一覧

NO	項目	単位等
1	災害数	(人)労働者死傷病報告による
2	死亡数	(人)同上
3	延長	(100m)工区施工距離
4	施工月数	(月)
5	工費	(億円)
6	掘進時間	(1000hour)
7	平均岩種	$\frac{\sum g_{i1} L_i}{L}$ 国鉄岩分類長さ別重み付け
8	支保工建込本数	(100本)
9	支保工建込量	(1000本cm)
10	コンクリート打設量	(10000cm)厚さ×長さ
11	下盤コンクリート打設量	インバート 2 (100m) りょう盤 1
12	下盤コンクリート敷設割合	(%) 延長に対する割合
13	電力設備	(km) 最大設備容量
14	掘削工法	1. 底設導坑上半断面 2. 上部半断面先進工法 3. 側壁導坑上半断面 4. 混合方式
15	運搬システム	1. タイヤ方式 2. レール方式 3. 混合方式
16	坑口形式	1. 普通坑口 2. 斜坑・立坑 3. 横坑 4. 複数坑

* 国鉄では工期算定などのために、掘削地山を岩種、弾性波速度等をもとに、I (風化がはなはだしくきわめて脆弱)~IV (風化はなくきつ間隔は 1m 程度) までに等級分類しており、岩盤分類等級値が大きいほど掘削地山は安定している。

もって 100 H 支保工 1 本に換算した。支保工建込量とは、鋼アーチ支保工の建込本数と、それぞれの断面積の積和である。コンクリート打設量には、コンクリートの各覆工厚とその打設長の積和として求め、下盤打設量はインバートを 2、りょう盤を 1 と重みづけた施工長とし、全延長に対する割合が下盤覆工割合である。電力設備には最大電力容量 (kW) を用いた。またカテゴリ変数として、掘削工法 (底設導坑先進工法など 4 分類)、ざりや資材等の運搬システム (タイヤ方式など 3 分類)、および坑口形式 (立坑、斜坑など 4 分類) の 3 個の変数を加えた。

なお、施工条件を記述する変数はここでとりあげた以外にも、たとえば地下水位条件に関するものなどいろいろあると思われるが、工事記録から各工区に共通して得られた項目には限りがあり、今回抽出した程度のものに限られた。

労働災害の資料は、工区ごとに発生数と死亡数に分けて集計した。全災害発生数とは別に死亡災害をとりあげたのは、死亡災害は休業災害とは異なり、工事の遅延、作業員の志気の低下など、工事全般にさまざまな影響を与える場合が多いと思われるからである。

75 工区のそれぞれについて上に述べた変数を調べたのち、工区間の相互の比較を容易にするために、各工区の施工長で残り 12 個の連続変数を除いてデータを基準化した。基準化のための変数として施工距離を選んだのは、他の工費や施工月数、あるいは掘削時間数などが工事の結果として定まる数値であるのに対し、施工長は変動のない固定された値だからである。

分析に先立ち、まず得られたデータが均質であるか否かの検証のために、12 個の基準化された変数を 1 変数ごとに、3 次積率 (skewness) および 4 次積率 (kurtosis) を用いて異常値有無のチェックを行った。その結果、たとえば海底トンネルでの工区や、施工長が 500 m 未満の短いトンネルを中心に、全部で 6 工区に外れ値 (ある値がほかの値と比べて著しく大きかったり、あるいは小さかったりする値) と思われる値を検出した。そこで、データの均質化のために、これらの工区を分析の対象から除いた結果、最終的に分析の対象とする工区数は全部で 69 工区となった。

3. 多変量解析法による分析

(1) 変量間の相関関係の分析

ひとくちにトンネル工事といっても、施工距離、掘削工法、岩種、施工工期など工事に関連した変数は各工区ごとに異なっており、また工事中に発生した労働災害数も工区ごとに大きなばらつきがみられる。これら工事に関連した変数と災害との相互関係、および各工事変量間

の相互関係を知るために相関分析を行った。分析では、実際の施工条件のもとでの関連を知るために、まず、実績値による相関関係を求め、次いで、工事規模の影響を取り除いた基準化変数によって単位工事量当たりの相互関係を調べた。表-2 に実績値による分析結果を示した。同表より、各変量間の相互関係が知られるが、変量のうち下盤覆工割合と平均岩種が比の形で表わされているほかはすべて総量値を示す変量なので、上記の2変量を除くと変量間の相関係数はすべて正となっており、延長—総掘進時間数、延長—総工費を始めとして多くの項目との間に強い相関関係がみられる。

施工距離が長くなるに従って災害発生数はもとより、工費、掘進時間数、支保工建込量などの工事変量が増えるのは当然であるが、下盤覆工割合が多くの変量と負相関にあることは興味もたれる。これは施工距離が長くなれば工事変量が増加すると同時に、平均岩種の値も高くなるので ($r=0.53$)、岩種の値が大きくなるに従い、下盤が施工される割合が下がったため ($r=-0.86$) と思われる。

また、基準化されたデータ間での相関係数を求めた結果を表-3 に示した。データが単位距離当たりの値となったので、工事変量間では表-2 に示されたほどの強い相関関係はみられない。災害に関しては、まず、災害発生率がどの変数ともほぼ無相関に近いこと、および死亡災害発生率が全災害発生率と平均岩種以外の工事変量とはすべて負の相関にあることが特徴としてあげられる。

また表-2 での下盤覆工率に代わって、表-3 では平均岩種が多くの工事変量と負の相関にある。工区の平均的な岩特性値を示す平均岩種は、この数値が大きいほど地山性状が良いことを示している。したがって、この値が大きくなれば、距離当たりに要する支保工建込数、コンクリート覆工厚などの単位工事量が少なくて済むので負相関となっている。

単位距離当たりの工事量が大きくなるほど、あるいは平均岩種の値が小さくなるに従って死亡災害発生率が小さくなっているが、これは、平均岩種(地山指標)が低いほど、掘削地山の性状が悪く難工事となる場合が多いので、単位距離当たりに要する工事量が増すと同時に、難工事のため工事が慎重かつ安全に進められた(単位工期と岩種が負相関であるように、地山が悪いほど施工速度が遅くなっている)結果を示していると思われる。

(2) 主成分分析による情報集約⁹⁾

本節では、前節で得られたデータ構造に関する特徴、たとえば、多くの実績値工事変量間で強い相関がみられる一方で、災害率はあまり相関がみられなかったことなどをさらに掘り下げて検討するために、多くの変量をより少ない次元に情報を集約して解釈を試みる主成分分析法によって分析を行った。データは相関分析と同様に、実際の施工条件のもとでの実績値と、規模の影響を除いた基準化変数との両方を用いた。

表-4 は実績値による主成分分析の結果であり、表中の各変量に対応した数値は、各主成分と元の変数との相

表-2 実績値データ相関マトリックス

	災害数	死亡数	延長	施工月数	総工費	掘進時間	平均岩種	支保工数	建込量	総打設量	総下盤量	下盤率	電力容量
災害数	1.000	0.550	0.674	0.520	0.705	0.670	0.372	0.715	0.678	0.682	0.313	-0.278	0.743
死亡数	0.550	1.000	0.681	0.507	0.648	0.650	0.396	0.645	0.523	0.668	0.058	-0.404	0.481
延長	0.674	0.681	1.000	0.736	0.969	0.981	0.529	0.949	0.823	0.937	0.170	-0.493	0.740
施工月数	0.520	0.507	0.736	1.000	0.738	0.726	0.402	0.739	0.675	0.750	0.208	-0.359	0.616
総工費	0.705	0.648	0.969	0.738	1.000	0.971	0.430	0.960	0.864	0.979	0.318	-0.368	0.809
掘進時間	0.670	0.650	0.981	0.726	0.971	1.000	0.378	0.957	0.865	0.991	0.292	-0.369	0.744
平均岩種	0.372	0.396	0.529	0.402	0.430	0.378	1.000	0.407	0.224	0.436	-0.419	-0.857	0.378
支保工数	0.715	0.645	0.949	0.739	0.960	0.957	0.407	1.000	0.924	0.968	0.349	-0.331	0.762
建込量	0.678	0.523	0.823	0.675	0.864	0.865	0.224	0.924	1.000	0.876	0.548	-0.103	0.691
総打設量	0.682	0.668	0.937	0.750	0.979	0.991	0.436	0.968	0.876	1.000	0.290	-0.387	0.744
総下盤量	0.313	0.058	0.170	0.208	0.318	0.292	-0.419	0.349	0.548	0.290	1.000	0.615	0.349
下盤率	-0.278	-0.404	-0.493	-0.359	-0.368	-0.369	-0.857	-0.331	-0.103	-0.387	0.615	1.000	-0.269
電力容量	0.743	0.481	0.740	0.616	0.809	0.744	0.378	0.762	0.691	0.744	0.349	-0.269	1.000

表-3 基準化データ相関マトリックス

	災害率	死亡率	単位工期	単 価	掘進時間	平均岩種	支保工数	建込量	覆工厚	下盤量	下盤率	電 力
災害率	1.000	0.047	0.018	0.216	-0.070	0.055	0.163	0.119	0.005	0.020	0.029	0.230
死亡率	0.047	1.000	-0.415	-0.236	-0.394	0.373	-0.277	-0.375	-0.335	-0.387	-0.389	-0.293
単位工期	0.018	-0.415	1.000	0.120	0.425	-0.517	0.419	0.501	0.478	0.428	0.498	0.449
単 価	0.216	-0.236	0.120	1.000	0.524	-0.524	0.612	0.562	0.609	0.609	0.581	0.315
掘進時間	-0.070	-0.394	0.425	0.524	1.000	-0.945	0.624	0.694	0.774	0.734	0.773	0.355
平均岩種	0.055	0.373	-0.517	-0.524	-0.945	1.000	-0.690	-0.770	-0.855	-0.807	-0.857	-0.330
支保工数	0.163	-0.277	0.419	0.612	0.624	-0.690	1.000	0.894	0.750	0.721	0.776	0.335
建込量	0.119	-0.375	0.501	0.562	0.694	-0.770	0.894	1.000	0.822	0.803	0.864	0.327
覆工厚	0.005	-0.335	0.478	0.609	0.774	-0.855	0.750	0.822	1.000	0.833	0.903	0.272
下盤量	0.020	-0.387	0.428	0.609	0.734	-0.807	0.721	0.803	0.833	1.000	0.933	0.332
下盤率	0.029	-0.389	0.498	0.581	0.773	-0.857	0.776	0.864	0.903	0.933	1.000	0.326
電 力	0.230	-0.293	0.449	0.315	0.355	-0.330	0.335	0.327	0.272	0.332	0.326	1.000

表-4 実績値による主成分分析

主成分	1	2	3	
固有値	8.4313	2.2968	0.5980	変数累積 寄与率
寄与率	0.6486	0.8252	0.8712	
災害数	0.7741	0.0818	0.5073	
死亡数	0.7110	-0.1620	-0.1666	0.5595
延長	0.9719	-0.0896	-0.1308	0.9697
施工月数	0.7891	-0.0228	-0.1486	0.6453
総工費	0.9762	0.0658	-0.0658	0.9617
掘進時間	0.9644	0.0664	-0.1654	0.9619
平均岩種	0.5072	-0.7503	0.2051	0.8623
支保工数	0.9707	0.1057	-0.0896	0.9615
総建込量	0.8800	0.3389	-0.0558	0.8924
総打設量	0.9763	0.0412	-0.1470	0.9764
総下盤量	0.2848	0.8918	0.1190	0.8905
下盤率	-0.4369	0.8649	-0.0343	0.9401
電力容量	0.8228	0.1119	0.3897	0.8414
備考	工事規模	地質		

表-5 基準化変数による主成分分析

主成分	1	2	3	
固有値	6.9006	1.2504	1.1700	変数累積 寄与率
寄与率	0.5750	0.6793	0.7767	
災害率	0.0716	0.9006	-0.0927	
死亡率	-0.4763	0.1043	-0.5513	0.5417
単位工期	0.5811	-0.0110	0.6122	0.7126
単価	0.6709	0.2931	-0.3474	0.6568
掘進時間	0.8592	-0.1932	-0.0063	0.7757
平均岩種	-0.9148	0.1970	0.0238	0.8762
支保工数	0.8480	0.1513	-0.1823	0.7753
建込量	0.9085	0.0478	-0.0982	0.8372
覆工厚	0.9166	-0.1105	-0.1534	0.8760
下盤量	0.9064	-0.0685	-0.1196	0.8406
下盤率	0.9454	-0.0831	-0.0999	0.9107
電力	0.4533	0.4662	0.5202	0.6934
備考	地質・規模	災害		

関係数を示す因子負荷量であり、また表中での主成分のもとで個々の変数が説明される割合が変数累積寄与率によって示されている。今回の主成分分析では相関係数行列を用いて分析を行ったので、解釈の対象とする主成分は、主成分の分散である固有値が1.0以上の軸とし、同表より、固有値が1.0以上の主成分は2つあり、その2主成分によって全分散の83%が集められている。第1主成分の特性を調べるために、各変数の因子負荷量を見ると、下盤率が負以外他の変数はすべて正でかつ延長、総工費、掘進時間、支保工数、総建込量、総打設量などが高い相関であることがわかる。これらの変量はいずれも工事全体の量を表わす変量であり、数値が大きいくほど工事規模も大きい。したがって、この第1主成分軸は、工事の大きさ、規模を示す因子と考えられる。69工区を第1主成分のスコアの順に並べると、これは工事の総合的な大きさの順になっていると思われる。また、第2主成分での係数は正負のものが混じっているが、負の方向で平均岩種が、正方向で総下盤覆工量、下盤率が大きな値を示しており、明らかにこの主成分は地質性状を示す成分と考えることができる。第3以下の主成分は、固有値が1.0以下であったので解釈の対象としなかった。

同じく表-5は基準化変数に対して主成分分析を行った結果である。同表より、固有値が1.0以上の主成分は3つあり、その3主成分によって全変動のほぼ8割が説明され、特に第1主成分だけで58%の説明力があった。また、これら3個の主成分のもとでの変数累積寄与率は変数によっても異なるが、最も小さな比率である死亡災害率でも50%以上あることが示されている。

第1主成分の因子負荷量を見ると、負方向で平均岩種と死亡災害発生率が関連し、特に平均岩種との相関が高い一方で、他の掘進時間、支保工数、建込量、覆工厚など多くの単位工事変量は正方向で強い相関にあることが

わかる。トンネル工事では一般に、掘削地山が悪ければ、単位施工長当たりの支保工建込数、覆工量などの工事変量が増え、かつ単位長さに要する施工月数（単位工期）も増加し、掘削地山が良ければこの逆になる傾向があること、および、掘削地山が悪くなれば難工事となる可能性が高いので、慎重に工事を進めることから死亡災害の発生が少なくなる傾向があることを前節で述べたが、主成分分析ではこのことが第1軸に示されている。すなわち、第1主成分はトンネルの地質性状とそれに対応した単位当たりの工事量・規模を表わす成分とみなされる。一方、第2主成分では全体の災害発生率が強い相関を示しているが、ほかには電力容量を除くとほとんど無相関に近い状態にある。したがって第2主成分は災害に関する成分軸と解することができる。また災害発生率がほぼ単独で主成分軸を構成しているため、工区間で災害を評価するには、災害発生率による一元的評価が可能と思われる。第3主成分では単位工期、電力が正方向で、また死亡率が負方向で比較的高い相関関係があるほかは特徴的なことはあまりなく、明確な解釈はできなかった。

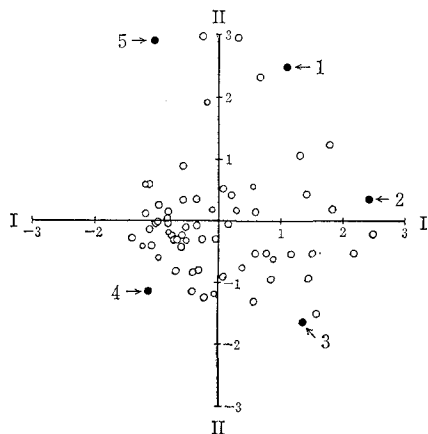


図-1 主成分分析・主成分得点分布

表一6 いくつかの工区の変数特性

工区	特 徴
1	ほぼ平均的な地質のトンネルだが、単位工事量はどれも比較的大きい。災害発生率は6番目に大きい。
2	悪い地質で、どの変量も一樣に大きく、特に支保工数、建込量、下盤量など1番、2番の大きさである。災害発生率は平均的値であり、施工速度はやや遅い。
3	あまり良い地質でなく、下盤覆工量や単価が大きな値を示す。災害発生率は2番目に小さい。
4	岩性状はやや良い。支保工数、建込量が少く、施工速度は2番目に速い。災害発生率は5番目に小さい。
5	岩性状は非常に良く、どの工事変量も平均して低く特に掘進時間と覆工厚は2番目に小さい値である。施工速度は平均的であり、災害発生率は1番高い。

また工区ごとに第1および第2主成分の成分得点を求め、その得点を二次元座標（横軸—第1主成分得点、縦軸—第2主成分得点）にプロットすると図一1を得る。同図に全分散のほぼ2/3が集約されているので、サンプルの散布状態の大きな傾向は同図でわかる。また、各工区は工事変量、災害特性が以下の内容に即して各象限第1象限：地質悪、単位工事量大、災害発生率高
第2象限：地質良、単位工事量小、災害発生率高
第3象限：地質良、単位工事量小、災害発生率低
第4象限：地質悪、単位工事量大、災害発生率低に布置している。このうちのいくつかについて、基本統計量との関係を調べて、工区の特性をより詳しく調べた結果を表一6に示した。

(3) 判別分析による死亡災害の分析

全体の災害発生率はどの工事変量ともほとんど無相関な状態で明確な特徴を見出し得なかった一方で、死亡災害発生率は多くの工事変量と負相関、あるいは主成分第1軸で平均岩種とともに負方向にあることなど、全体の災害発生率とはかなり異なった様相を呈していることがわかった。そこでここでは、判別関数を用いて工事中に死亡災害が発生した工区と、発生しなかった工区とに、2群に分類することを試みた。なお、実績値による分析では、変数ごとに変動範囲が大きく異なるために、各変数の判別効果の程度を明確にすることができないことがわかったので、ここでは、変動範囲がほぼ同程度である基準化変数を用いて分析を行った。

判別関数はできるだけ少数の変数によって構成され、かつできるだけ判別効率が高く、誤判別となる確率の少ないものが望ましい。判別効率の高い変数を逐次的に選択し、判別確率を調べながらさまざまな変数の組合せの判別関数を求める過程を表一7に示した。表中のD**2は2群間のマハラノビス距離、Pro.は正規近似による判別値の誤判別確率⁶⁾、Dは判別関数を用いて判別し、誤分類された工区数、J.K.は判別式の良さを検証するJack-Knife⁷⁾によって評価した際の誤分類の工区数で

表一7 判別分析における変数選択

変 数	D**2	Pro.	D	J.K.
X ₃	1.597	26.37	14	14
X ₃ , X ₆	1.875	24.68	15	16
X ₃ , X ₈	1.879	24.65	16	17
X ₃ , X ₉	1.676	25.87	17	17
X ₃ , X ₁₀	1.990	24.03	13	14
X ₃ , X ₁₁	1.881	24.64	13	16
X ₃ , X ₉ , X ₁₀	2.115	23.36	14	15
X ₃ , X ₅ , X ₉ , X ₁₀	2.317	22.33	15	17

X₃: 単位工期 X₅: 単位掘進時間 X₆: 平均岩種
X₈: 単位建込量 X₉: 平均覆工厚 X₁₀: 下盤打設量
X₁₁: 下盤コンクリート敷設割合

ある。

同表より、選択変数の組合せとしてはX₃, X₁₀の2変数が適切と思われ、またX₃のみでもかなり有力な判別関数たり得ることがわかる。上記2変数による判別関数と判別基準は以下のとおりである。

$$Z = -3.621 + 0.174 X_3 + 0.016 X_{10}$$

$$Z < 0: \text{死亡あり}, Z > 0: \text{死亡なし}$$

同判別式による誤判別率は13/69(約19%)であった。同式より、X₃: 単位工期(月/km)が判別に大きく影響し、施工速度が速いほど(単位工期が小さくなる)、死亡ありと判断される確率が高くなり、逆に遅くなると死亡なしと判別されやすくなることわかる。同様に、X₁₀(下盤打設量)も多いほど死亡なしと判別されやすくなるが、判別に与える影響力は単位工期ほどには大きくない。そこで、X₃のみによる判別関数を求めると、

$$Z = -3.232 + 0.201 X_3$$

となり、同式より単位工期が、X₃ > 16.08月/kmであれば、その工区は死亡なしと判別され、同式による誤分類確率は約20%である。いずれの判別関数にせよ、単位工期、あるいは下盤覆工量などが多いほど死亡災害が少なくなる事実は、前節での相関分析や主成分分析で得られた解釈結果(掘削地山の地質性状が悪くなれば、施工速度が遅くなったり単位工事量が増加する一方で、死亡災害の発生が少なくなる)と一致し、これらの判別関数が、これまでの分析結果とも整合性を有していることを示している。

(4) 重回帰分析による災害発生数の予測

本節では各工区での災害発生数の予測および発生数と工事変量との関連を調べるために重回帰分析を行った。データには、相関分析で基準化した災害率が多く単位工事量とあまり相関がないことがすでにわかっているので、ここでは、目的変数を各工区の災害数とし、説明変数には11個の連続変量実績値および3個のカテゴリー

変数を用いた。なお、実績値による重回帰分析と基準化変数によるそれとを対比してみると、実績値によって重回帰分析を行うことが、基準化変数の場合では、規模を表わす変数(1/延長)を新たな説明変数として付け加えて分析を行うことに相当することが示され、結局、実績値による重回帰分析が規模効果を考慮した分析であることがわかる。実際の重回帰方程式では判別関数と同様に、これらの変数がすべて取り入れられるわけではなく、説明変数間の相関があまり高くなく、操作や観測がしやすくかつ目的変数の変動をよく説明できる少数の変数を選択することとなる。

さて前節での主成分分析により、今回とりあげた変量群が、いくつかの主成分によってその変動の大半が説明されることがわかっている。そこでここでは、これらの変数をいくつかの特性の似かよったグループに分けることを目的として、バリマックス法によって変数の分類を行った⁹⁾。表—8は実績値による分析結果であり、表中の数値は各成分軸と変数との間の相関係数である。同表より、今回抽出した変数群は主成分分析と同様に、工事規模、災害、地質などの因子にグループ化できることが示されている。そこで、それぞれの変量グループより説明変数として1個ずつ変数を選び出し(同一グループから複数個の変数を選んで、多重共線性関係が生じて信頼性の低い回帰式となることが多い⁹⁾)、それらの変数による重回帰方程式の計算を行った。

算出した重回帰式には、分散分析や重相関係数(寄与率)、あるいは残差分析により式全体の有効性の評価を行い、また、選択した説明変数についても、偏回帰係数の検定による評価を行った。さまざまな変数の組合せに対して、重回帰式の導出とその評価を繰り返し、そのうちで有効と思われた分析結果を表—9に示した。ただし分析の過程で、目的変数(災害発件数)が実績値のままでは誤差の等分散性が保障されないことが残差分析によ

表—8 因子分析(バリマックス法)

	STRUCTURE VECTOR			
	I	II	III	IV
災害数	0.6189	<u>0.7630</u>	0.0237	0.0469
死亡数	0.5780	0.2171	0.2064	0.0434
延長	<u>0.9567</u>	0.0962	0.2362	-0.0203
施工月数	0.7031	0.0946	0.1403	-0.1173
総工費	<u>0.9648</u>	0.1383	0.0907	-0.1068
掘進時間	<u>0.9832</u>	0.0757	0.0845	-0.0170
平均岩種	0.3056	0.2036	<u>0.8382</u>	-0.0907
支保工数	<u>0.9661</u>	0.1435	0.0562	-0.0204
総建込量	<u>0.9033</u>	0.1478	-0.1698	0.0221
総打設量	<u>0.9794</u>	0.0893	0.1123	-0.0089
総下盤量	0.3469	0.1440	<u>-0.8145</u>	-0.1021
下盤率	-0.2699	-0.1113	<u>-0.9326</u>	0.0121
電力容量	0.7129	0.4179	0.0245	<u>-0.5624</u>
備考	規模	災害	地質	電力

表—9 重回帰分析分析結果(1)

変数	偏回帰係数	T 値	偏相関係数
平均岩種	0.4609	2.2802*	0.2741
建込量	0.0126	2.5216*	0.3006
電力設備	0.1473	3.2729**	0.3787
工法: 底設等	0.2810	3.270**	0.3784
上半	-0.9310		
常数項	1.5162		
重相関係数	0.8116	* 5% 有意	
寄与率	0.6587	** 1% 有意	

て明らかとなったので、誤差分散安定化のために実績値に平方根変換を施し、その変換値を新たな目的変数として重回帰式の導出を行った。また、説明変数には、母偏回帰係数が0の仮説検定を行い、5%以下の有意水準で帰無仮説が棄却されたものを変数として採択した。

同表に示された4変数での重回帰式によって災害の変動の約2/3が説明され、また、カテゴリー変数では掘削工法が変数として採択され、かつ分類区分も4区分よりは、上部半断面先進工法とそれ以外の工法の2区分のほうが統計的に有意な分類区分となった。地質関連の変数では平均岩種が採択され、地山が良くなるに従って災害数が増えることは、悪地質であれば死亡災害が少なくなることと軌を一にして興味深い。偏相関係数およびT値より、掘削工法と電力容量が災害に対してほぼ同程度の説明力を有していることがわかるが、電力容量と災害との因果関係を明らかにすることができなかった。そこで、電力容量を除き再度重回帰分析を行い、表—10にその結果を示した。

同表より3変数の場合でも、表—9とまったく同じ変数が採択され、かつ偏回帰係数の符号にも変化がないことが示されている。重相関係数は0.81から0.78へと下がったがなお6割ほどの寄与率を示している。また、変数では支保工建込量の説明力が大きな値となっている。

表—10 重回帰分析分析結果(2)

変数	偏回帰係数	T 値	偏相関係数
平均岩種	0.6745	3.2888**	0.3777
建込量	0.0231	5.6604**	0.5746
工法: 底設等	0.2610	2.841**	0.3324
上半	-0.8650		
常数項	1.2259		
重相関係数	0.7756		
寄与率	0.6016	** 1% 有意	

これは鋼アーチ支保工の導入により、トンネル工事の労働災害の発生形態が、落盤災害のように大規模偶発型から、落石災害や重量物取扱中の災害などの小規模頻発型へと移行している調査結果¹⁰⁾と一致している。

以上要するに、判別分析と同様に、これまでに得られた知見と整合性を有する重回帰分析の結果と思われる。

4. 結 語

以上、トンネル工事の中で労働災害を事例としてとりあげ、多変量解析法により施工条件と労働災害との関連を分析した。その要点を記すと、

(1) 災害発生数は工事規模に比例して増えているが、施工距離で平均化した発生数(災害発生率)は他の変量と相関関係がみられなかった。ただし、死亡災害は地質が悪く、距離当たりを要する工事量が多く、施工速度が遅いなど、難工事と思われるほど発生率が低くなる傾向があることが示された。

(2) 工事に関連したさまざまな変量を主成分分析法によっていくつかの成分に集約してみると、工事規模成分、地質成分、および災害成分の3つの成分に大別された。災害は他の要因と無相関にほぼ独立に発生しているので、工区間で災害発生状況を比較するには発生率を用いればよく、また、発生数の評価には、ポアソン分布が適用できることがわかった。

(3) 施工速度や下盤覆工量が死亡災害発生の有無に大きく影響していることが判別関数による分析で示された。すなわち、下盤覆工打設量が少ないほど、あるいは施工速度が速いほど死亡災害が発生しやすくなる傾向がみられた。

(4) 災害発生数を予測するための重回帰分析では、掘削地山の性状値(岩種値)、支保工建込量、掘削工法などが説明変数として選択された。地質性状が良いほど災害発生数が増えることや、支保工建込量が予測に大きな役割を果たしていることが明らかになった。

5. あとがき

工事中の労働災害に関する発生特性のいくつかを多変量解析を通して示した。多変量解析の目的は多くの変数間の相互関係を分析することにあるが、今回の分析では、死亡災害が地質や施工速度の影響を受けることや、全体の災害率が他の変量と無相関であることが明らかと

なった。今回対象とした工事では、災害が全体としてはほぼ独立に近い状態で発生していると考えられ、したがって、その防止対策は、安全管理体制の組織化、作業現場の整備点検、作業員の教育訓練の実施など、幅広い安全管理活動によって工事環境全般を改善させることが重要と思われる。

なお、今回対象としたトンネル工事は新幹線工事という大規模なものであり、また施工法も鋼アーチ支保工建込み、コンクリート覆工という伝統的な工法が主体である。したがって、中小トンネルや、また最近急速に普及しつつあるロックボルト建込み、コンクリート吹付けによる、一般にNATM工法とよばれる工法には触れていない。これらのトンネルについても、今後データを積み重ねて分析を進めてゆきたいと考えている。

最後に、本研究を進めるにあたり、災害資料の利用には広島・山口両労働基準局のご協力を得ました。また解析の多くに、芳賀敏郎慶応義塾大学講師(現東京理科大学教授)が開発された会話型多変量解析用プログラムを利用して頂きました。また、大橋靖雄東京大学医学部講師から有益なご助言を頂いたほか、松原望筑波大学助教授(現東京大学教養学部教授)より土木計画学研究発表会で貴重なコメントを頂きました。さらに五十嵐日出夫北海道大学教授から暖かい励ましを頂きました。ここに厚く感謝の意を表する次第です。

参 考 文 献

- 1) 産業安全年鑑(昭和59年版)、中央労働災害防止協会刊、pp. 147~179, 1984.
- 2) 鈴木芳美:C.T.A.を用いた災害分析法について、労働省産業安全研究所技術資料、RIIS-TN-83-5, 1984.
- 3) 山陽新幹線岡山・博多間工事誌、日本国有鉄道新幹線建設局、昭和52年3月。
- 4) 斉藤 徹:鉄道技術研究報告、No. 965(施設編第435号)、鉄道技術研究所、1975.
- 5) 奥野忠一ほか:多変量解析法(改訂版)、日科技連、pp. 159~226, 1981.
- 6) 奥野忠一ほか:続多変量解析法、日科技連、pp. 77~80.
- 7) M.G. ケンドール(奥野忠一・大橋靖雄共訳):多変量解析、培風館、pp. 247, 1981.
- 8) 芝 祐順:行動科学における相関分析法、東京大学出版会、pp. 131~149, 1972.
- 9) S. チャタジー・B. プライス(佐和隆光・加納悟共訳):回帰分析の実際、新曜社、pp. 158~192, 1983.
- 10) 前 郁夫・花安繁郎:トンネル建設工事における労働災害の動向、労働省産業安全研究所技術資料、RIIS-TN-74-6, 1975.

(1985.10.22・受付)